

# 地球、空气、氡和住宅

Anthony Nero<sup>1)</sup>

本世纪核技术在医疗、能源和武器等方面的应用加深了人们对有害辐射效应的了解。很多人已认识到，核武器试验和核电站正常运行所产生的辐射远低于来自宇宙射线和地球的自然辐射。在放射医学上，为了诊断和治疗所采用的辐射剂量才可能与自然辐射相接近。

自然辐射产生的年平均辐射剂量约为 1mSv (millsievert, 用传统单位表示为 0.1 rem<sup>2)</sup>), 并随地点的不同而有所变化。人体除受到自然辐射外, 更重要的是受到由 Rn<sup>222</sup> 衰变到 Pb<sup>210</sup> 的过程中放射出的  $\alpha$  射线对肺部区域的辐射。

在我们呼吸的空气中含有放射性元素氡 Rn<sup>222</sup>, 由它衰变产生了短寿命的放射性核素钋。人们吸入后的几分钟内, 在肺还未将它们消除掉之前, 即已放射出  $\alpha$  射线而衰变为长寿命的铅核, 并沉积于肺部里层。由 Rn<sup>222</sup> 的衰变产物对人体的辐照就可说明在铀矿工作的矿工和其他矿工中肺癌发病率上升的原因。目前, 一般住宅的室内氡浓度通常是每立方米几十贝克勒尔 (Bq/m<sup>3</sup>)。由此推算出人体每年要接受 2—3mSv 的辐射剂量。这就超过了其他辐射源——自然的、医疗的、核动力和核武器——总的辐射剂量。

自 70 年代以来, 世界上越来越多的国家开始对室内氡的行为对健康的影响进行广泛研究。在美国的住宅中, Rn<sup>222</sup> 的平均水平接近 50Bq/m<sup>3</sup> (传统单位中为 1.4pCi/l)。大约有一百万套住宅, 其室内氡的水平比这个平均值还要高出 5—10 倍。这意味着, 人们住在这种房屋内所遭受的辐照与铀矿矿工所遭受的差不多。

一个早期研究的结果表明, 室内 Rn<sup>222</sup> 的

高浓度虽然与低通风速率有关, 但主要取决于氡输入室内的高速率。氡输入率的高低依赖于室内空气与地面间的微小压力差。这种压力差迫使空气从土壤内许多小孔渗出并进入室内。因这部分空气带着由自然存在于土壤中的镭 (Ra<sup>226</sup>) 衰变所产生的氡, 所以减少或阻止这种输入机制可显著降低室内氡水平, 从而为减轻公共辐照提供技术措施。不过一个有效的控制方案不仅需要原理的了解, 而且还要对地质、结构的、气象的以及对能影响氡输入过程的各种参量有一个较完整的图象。目前对我们来说最为重要的是, 对来自氡的危害作出较为系统的描述。这包括在不同环境内, 尤其是在我们的住宅内对该危害的可接受程度。

## 一、室内氡的来源

室内、外空气中的 Rn<sup>222</sup> 是人们普遍关注的一种同位素, 因为在 U<sup>238</sup> 衰变系内的放射性核, 包括氡的母核 Ra<sup>226</sup> 在地壳内微量存在, 一旦形成半衰期约为四日的 Rn<sup>222</sup>, 它就可能会穿过地壳或建筑材料进入到大气中。室内氡浓度的典型值为 5—10Bq/m<sup>3</sup>, 主要取决于来自离地面约为 1m 深范围内土壤中氡的扩散。这正是我们最关心的影响室内氡浓度的因素。

在一般住宅内, 降低通风速率对于节能可能是一行之有效的方法, 但这样做有可能使室内所产生的污染物得不到有效的排出, 致使污染物的浓度升高。因此, 人们想方设法检测各

1) Anthony Nero 是洛伦兹实验室环境研究计划的高级科学家。

2) 1rem 的辐射剂量对人体或动物来说等效于 1R X 射线所产生的剂量。

种房屋的室内氡浓度与通风速率的关系，现已获得令人惊讶的结果。

这些结果表明，决定室内氡浓度高低的主要因素来自于氡输入室内的速率，而不是通风速率。由于在不同住宅中氡的输入速率有明显的差别，所以室内氡浓度随住宅的不同而相差很大。此外，室内氡浓度的主要来源是裸露的土壤内氡的扩散，而建筑材料（混凝土含有地壳内的氡）内部分子的扩散对室内氡浓度的贡献是很小的。

## 二、自然对流

自然对流促使室内外之间的空气进行交换。即使在冬天门窗紧闭时，通过建筑物壳层内的缺陷和围绕门窗的缝隙以及电线、水管的开口处，空气也能进入或离开室内。如果使室内的温度升高，则室内的空气将向上流动并聚积在室内的较高处，产生了上浮的或“堆”的效应。因此，含有氡的空气被吸进到室内的较低部分，因“堆”的效应而从较高处离去。风与“堆”的效应在小建筑物的墙壁间虽然只产生几个 bar 的小压力（小于万分之一的大气压），但是这点压力却显著地引起了住宅内的空气流动。

由于土壤颗粒间空气含氡浓度的典型值是几万 Bq/m<sup>3</sup>，因此室内空气中只要有 0.1% 是从土壤中渗入的，就会产生相当于目前的室内平均氡浓度即 50Bq/m<sup>3</sup>。而长期对室内浓度、通风速率、源的特性和环境参数（包括风、室内墙壁间的温差或压力差）的实地测量的结果都表明，室内高的氡浓度是因为房屋吸入了来自土壤中的氡。

上面曾提到，风和温度差把室内空气变为“堆”，吸入荷载氡的空气进入室内较低部分，然后从较高处离去。正是“堆”在氡的产生速率、土壤气体的输入速率以及通风速率之间的平衡，决定了室内氡的浓度。这些速率中的每一个都分别与另一组的某个物理参量有关。它们分别是土壤中镭的浓度、土壤和地下结构对气流的

可透性和房屋外壳的泄露性。观察发现，室内氡的浓度主要不是取决于通风速率，这就大体上等效于认为它取决于镭的浓度和可透性。

有了上面的基本了解，就可采取具体步骤来减少室内氡浓度。对于大多数房屋，我们不仅可以通过密封压紧建筑物缝隙的办法来显著增加对土壤气体流动的阻力，而且还可以依靠改变输入处的压力场，使土壤中的气体不再流进建筑物内。虽然关于氡输入室内的过程还需要更多地了解，不过由通风管道系统对底层结构地基下的土壤或砂石增压或减压以及给已有的污水坑与排水系统通风，都确实能够显著地减少氡的输入。

## 三、勘测结果

室内的辐照取决于土壤的特性、建筑物的类型、该地区的气候、室内通风系统的设计和住户的行为。观察表明，由于这些因素的相互作用，使室内氡浓度有一广泛的分布范围。了解氡浓度的分布对于估计室内氡的危害和确定控制氡的方案是必不可少的。为此，研究人员常用积分探测器对住宅进行系统勘测，现已确定了大多数欧洲国家室内氡的平均浓度分布范围是 20—50Bq/m<sup>3</sup>。在斯勘地那维亚地区，室内氡的平均浓度大约是 100Bq/m<sup>3</sup>。在美国对某些州或市区进行实地勘测的结果表明，氡的浓度随地区的不同而相差很大，有不少住宅室内氡浓度远大于 50Bq/m<sup>3</sup> 的平均值。例如，在宾州东部已发现室内氡浓度高达 2500Bq/m<sup>3</sup>。目前美国环保局（EPA）规定对室内氡浓度高于 150Bq/m<sup>3</sup> 的住宅，应设法采取有效的措施来降低氡的浓度。

## 四、氡的衰变产物

作为气体在放射学上，氡的重要性在于它将 U<sup>238</sup> 衰变系的部分产物输送到我们赖以生存的空气中。Rn<sup>222</sup> 的短寿命衰变产物有 Po<sup>218</sup>，Pb<sup>214</sup>，Bi<sup>214</sup> 和 Po<sup>214</sup>。它们都是活泼的化学元

繁,当人们吸入空气时,它们就会进入支气管而沉积在肺部。由于它们的半衰期是如此短暂,以至于在肺部还未来得及消除它们之前,就已衰变为长寿命的  $Pb^{211}$ 。正是由于  $Po^{218}$  与  $Po^{214}$  的  $\alpha$  衰变,对支气管的上皮层有较大的辐射,因而造成在地下工作的铀矿矿工以及受到这类辐射的动物肺癌的发病率上升。

长期以来,人们一直十分关注辐射与健康的关系。大量的理论工作是设法弄清楚衰变产物是如何通过肺部的,如何在支气管的各个部分沉积以及如何被肺部的清除机制所排出。现在科学家们已经知道,由于同位素钋发出的  $\alpha$  质点在支气管上的密积能量沉积,因此  $\alpha$  质点对健康的危害要比  $\beta$  或  $\gamma$  射线大。几个国家对铀矿工人进行流行病学研究的结果表明,常年住在室内氡平均浓度为  $150Bq/m^3$  的人,得肺癌的几率将上升 1—3%,而室内氡平均浓度为  $50Bq/m^3$  住宅的住户得肺癌的几率将上升 0.5%。这虽不象吸烟者可能染上肺癌和其它疾病那样有高达 20—30% 的几率,但比其它“环境”的危害还是大许多。因此可以说,公众正受到氡的可觉察的危害。事实上抽烟的烟雾使公众得肺癌的几率为 4%,而氡的危害量级已达 0.5%,有时甚至为 1%。由此可以看出,在诱发肺癌方面,抽烟与氡衰变产物的辐射异曲同工。

## 五、控制的结果

控制室内氡浓度的任何方案,都必须包括能使该浓度降低的各种技术和一完善的措施。首先我们要了解哪些地方氡的水平过高,采用

什么样的技术来控制氡浓度;然后粗略地按照影响室内辐照的各个因素的重要性,将控制技术分类。其中最重要的因素就是氡的输入速率。通常人们采用能阻止氡从地下建筑结构进入室内的技术来降低室内氡的浓度。如象上面提到过的密封压紧建筑物缝隙。改变输入处的压力场,借助于排水通风管道系统等办法都可降低室内氡浓度。在这里我们要提醒大家注意的是,氡衰变产物的化学与物理行为在一定程度上决定了氡的辐照。从目前的观点看来,要降低氡的辐照,只依靠排气技术还是远远不够的。

现在急待解决的最棘手的问题是对室内氡浓度选定一个合理的指示线(guideline)。它应反映出人体对氡辐照的可承受能力,此外就是如何查找具有超高氡浓度的住宅和建立起一个较好的理论框架——室内氡或其他污染物的浓度如何依赖于各种因素的模型。我们希望通过这种理论框架对控制室内氡浓度的技术进行更有效地选定与实施,并提供其理论依据。

关于室内氡的危害,存在着许多不同看法,其中有两种极端的观点:一种认为室内氡的辐照是不值一提的区区小事;另一种是环保局的想法,即认为来自氡的危害是“可怕的”。事实上这两种观点都是片面的,不切实际的。我们充分相信,从目前众说纷云的观点中,必将会产生一个有效的考虑到室内氡危害的环境规划。它将对查寻具有超高氡浓度的住宅和处理室内环境中的其他污染物提供标准判据和方案。

(王林根据 Physics Today 1989 年第 4 期  
第 32—39 页编译)

## 1990 年第 9 期《物理》内容预告

原子钟与拉姆齐(邓金泉);保罗与保罗阱(梅刚华);固体可调谐激光器近十年来的进展(邱承就);海洋电磁学(陈芸);发光在农业中的应用(唐树延);现代物理学方法与眼科研究(陈翠真);一种新颖的诊断技术——光学层面分析(是度芳等);新型的倍压和全波整流复合式直流电源(吕惠宾等);X 射线( $n, -n$ )双晶

衍射抑制高次谐波实验研究(姜晓明等);信号平均技术(翁尧钧);有机发光(金长青);晶格弛豫和黄-Rhys 多声子跃迁理论简介(朱邦芬);黄方程与极化激元(朱邦芬);黄散射——杂质或缺陷引起的漫散射(朱邦芬);杰出的固体物理学家——黄昆教授(甘子钊等)。